

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

内蒙古干旱区赛乌素金矿氧化带及 金表生地球化学研究

马民涛

(沈阳黄金学院地质系)

关广岳

(东北大学, 沈阳)



该矿是内蒙古干旱草原气候区典型的含金硫化物石英脉型矿床。研究表明:自全新世以来该氧化带一直处于干旱气候控制之下;金的表生演化除具有颗粒增大、形态复杂、品位变富和成色增高外,金、银出现双峰富集且基本处同一深度;这与潮湿气候区金、银以“单峰”富集及“上金下银”规律形成鲜明对比。太阳泵是金、银“双峰”富集的主要成因;金的下部富集与较低 pH 环境有关;伊利石 2M₁ 是金、银上部富集峰主要成因之一。

关键词 干旱气候 金矿氧化带 金的次生富集 古气候 太阳泵

1 自然地理环境及地质特征

该矿床位于中朝准地台中段,内蒙地轴北缘白云鄂博凹陷内。矿区海拔高度为 1560—1604m,地形坡度 5°—15°属丘陵地带。年最高温度 35—39℃,最低气候—33.5℃;结冻期由 10 月至次年 3 月,结冻深度 1.71—2.33mm,属干旱草原气候区;矿区具冬寒、夏热、昼夜温差大、降水少、蒸发大及植被不发育等特点。

矿区内出露地层为元古界白云鄂博群,该地层高含金性为本区金矿形成提供了丰富矿源基础。海西晚期花岗岩呈椭圆形侵入于哈拉忽鸡向斜核部,其面积约 2km²。后期动力变质作用使花岗岩体变为碎裂花岗岩和云母花岗岩糜棱片岩;岩体内形成一些北西向构造破碎带、石英脉及含金属硫化物石英脉金矿体。

2 矿床氧化带与古气候

2.1 矿床氧化带发育特征

该矿床南采区氧化带较发育,是内蒙古中部干旱草原气候区内生金矿氧化带的典型代表。氧化带一般深度为 50—70m,在构造断裂、破碎发育部位可达 120m。经现场观察结合镜下鉴定、X 光衍射等工作结果对氧化带进行了划分,各亚带地质特征见表 1。

各亚带之间除碳酸盐亚带与高价铁质亚带界线较清楚外,其它亚带之间均属渐变过渡关系。

地质事实证明了不同气候区金属硫化矿床氧化带地质特征存在较大差别^[1]。如在潮湿气候区,金属硫化矿床氧化带中的黄钾矾亚带、铁帽亚带和碳酸盐亚带(分别相当于该矿床的黄

褐色花岗岩风化亚带、高价铁质亚带和碳酸盐亚带)就不可能被保留下来;所以,干旱气候区相对潮湿气候对金属硫化矿床表生演化产物保留的较齐全。

表 1 赛乌素金矿床氧化带地质特征

Table 1 The geological features of oxidation zone in the Sain Us gold deposit

分 带	厚度(m)	矿 物 成 分			组 构	
		金属矿物	金、银矿物	脉石矿物	结 构	构 造
碳酸盐亚带	0.4—1.2	微量赤铁矿	自然金、自然银	方解石、石英为主,少量蒙脱石、高岭石	粒状	条带状磁松状
高价铁质亚带	1.5—7	赤铁矿为主,针铁矿次之	自然金 自然银	微斜长石、石英、伊利石、高岭石	压碎糜棱	角砾状 网脉状
黄褐色花岗岩风化亚带	20—25	针铁矿、水针铁矿为主,黄钾铁矾次之	自然金 自然银	微斜长石、石英、绢云母、高岭石、伊利石	压碎、糜棱、胶状肾状、皮壳状	角砾状、网脉状 蜂窝状、晶洞状
浅灰色花岗岩风化亚带	25—30	针铁矿、水针铁矿、黄钾铁矾为主,方铅矿、铜蓝、毒砂少量	自然金 自然银	微斜长石、斜长石、石英	压碎、蠕虫、反应边	网脉状、角砾状、块状
原生矿石带		黄铁矿、白铁矿为主,方铅矿、闪锌矿、毒砂、黄铜矿次之	自然金 自然银	长石、石英	自形一半自形粒状	网脉状、块状、浸染状

2.2 古气候对矿床氧化带的影响

通过对该矿区发育较好的土壤剖面中¹⁴C 年龄测定及孢粉分析,对古气候进行了恢复。在 80cm 厚的土壤剖面中,最底层土样的¹⁴C 年龄^①为 7685±85a,即相当于全新世早期。在土壤剖面中共发现三种主要孢粉^②见图 1。在 70cm 深处样品中发现 5 粒松属,50cm 深处样品中见有 43 粒蓼属,在 30cm 深处样品中出现 5 粒松属,在 10cm 深处找出 13 粒松属和 25 粒蒿属。松属与蒿属是耐旱品种,蓼属多为中等干旱与湿生植物。

据¹⁴C 年龄测定和孢粉鉴定,结合中国大陆气候,特别是第四纪以来气候总体变化规律^[2-4],笔者认为该土壤剖面底部时代相当于全新世早期,反映凉干气候特征;中下部时代相当于全新世中期,反映相对温湿气候特点;中上部时代相当于全新世的晚期,反映凉干的气候概貌。可见在近 1 万年的冰后期时间内,矿区基本上处于干旱气候条件下,只是在全新世中期

① 由北京师范大学¹⁴C 年龄实验室测定。

② 由中国科学院地质研究所孢粉实验室鉴定。

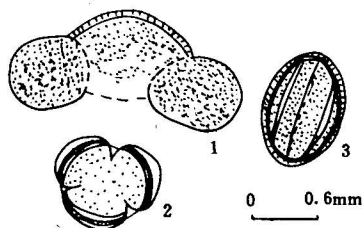


图 1 赛乌素金矿土壤剖面中的孢粉
Fig. 1 The sporopollen in the soil
of the Sain Us gold deposit

1. 松属(pinus); 2. 蓼属(polygonum);
3. 蒿属(artemisia) 1×600

气候有相对变得温湿迹象。现存该矿床氧化带地质特征及其中金、银空间分布规律可能受到全新世中期相对温湿气候微弱影响,但本质上不会有大的改变。可以认为,该矿床氧化带地质特征及其中金、银分布规律均具有干旱气候特征。

3 金在氧化带中赋存及富集规律

3.1 金的载体矿物

在原生矿石中,据主要矿物组成及金与各矿物赋存关系统计结果反映出:金的载体矿物主要是石英、黄铁矿及少量毒砂。有近一半的金包裹在石英中,约 20%的金赋存于黄铁矿裂隙中,约 20%的金分布在石英和黄铁矿颗粒之间,少量的金分布在毒砂裂隙中。

在氧化矿石中,金的载体矿物主要是石英、褐铁矿(高价铁质亚带上部以赤铁矿为主,向下以针铁矿为主)。

金粒的嵌布型式分别是包裹金和裂隙金;金粒直接与石英颗粒接触占 53.42%,直接与褐铁矿接触占 37.7%。在氧化带上部的石英脉及围岩(花岗岩)裂隙发育处是褐铁矿及粘土矿物发育的主要部位;粘土矿物的增加对金(特别是微细金)的吸附是肯定的。

3.2 金矿物粒度及型态特征

据矿区以往资料及笔者补充观察金粒统计结果列于表 2。

表 2 赛乌素金矿金的粒度分布统计

Table 2 The statistics of gold grain sizes of the Sain Us gold deposit

粒 级	粒径(μm)	原 生 金		次 生 金	
		粒数	含量(%)	粒数	含量(%)
巨粒	>300			102	7.67
粗粒	300—100	1	1.39	225	16.39
	100—74	2	2.78	28	2.11
中粒	74—37	3	4.17	99	7.45
细粒	37—10	11	15.28	493	37.10
微细粒	10—5	23	39.14	301	22.65
	>5	32	44.44	81	6.09
累 计		72	160.00	1329	100.00

从表 2 可看出:

(1)原生及氧化矿石广泛分布各粒级金粒;

(2)原生金粒的微细粒占绝对优势,中、细粒少见,无巨粒金;

(3)氧化矿石中,金粒大量出现;以细粒最多,微细粒次之,中、粗粒大量出现并有巨粒金生成。

金粒形态明显特征是：原生金粒主要以微细的粒状出现；次生金形态复杂多变，较多见的有枝叉状、叶片状、棒状、多角状、丝状和马发头状等反映金粒次生生长的特征。

3.3 金矿物成色特征

将该矿床部分有代表性金粒的电子探针测试结果列于表 3。

表 3 赛乌素金矿部分金粒成色特征
Table 3 The features of the gold grain purity of the Sain Us gold deposit

序 号	原 生 金			序 号	次 生 金		
	测试部位	成 色 值			测试部位	成 色 值	
		Au	均值			Au	均值
1	中心	840	837	7	中心	847	851
	中心	830			边缘	855	
	边缘	832		14	中心	839	839
	边缘	837		15	中心	850	861
	边缘	840			边缘	872	
2	中心	838	842	16	中心	961	961
	过渡	838		21	中心	834	832
	边缘	850			过渡	832	
3	中心	832	832		边缘	830	
4	中心	847	847	24	中心	846	849
5	中心	837	837		边缘	852	
均 值	839			均 值	856		
极 差	20			极 差	131		

注：由辽宁省分析测试研究中心电子探针室测定（据李广新，1992，笔者协助工作）。

测试结果反映如下规律：

- (1)原生金粒成色(平均 839)较次生金粒成色(平均 856.2)低；
- (2)原生金粒成色变化(极差 20)较次生金粒成色(极差 131)小；
- (3)单体原生金粒从内至外缘成色在波动中稍有提高；
- (4)单体次生金粒从内至外缘成色普遍提高。

值得一提的是表 3 中 21 号金粒，其成色从内至外缘是降低的，出现了“反常”现象；这是该颗粒在金自身净化过程初期，金、银是以物理扩散^①为主产生的结果。这是较难得到的现象之一。

3.4 氧化带中金、银空间分布规律

该矿氧化带中金、银空间富集变化规律见图 2。从图 2 中可见：金、银在氧化带中出现了双峰富集且基本处于同一层位；这与潮湿气候区铁帽型金矿氧化带中金、银以“单峰”富集且具

① 关广岳：界面成矿与金矿空间分布规律．中国黄金学会地质学术委员会第一届学术会议论文集．中国黄金学会地质学术委员会，陕西黄金局，1991．

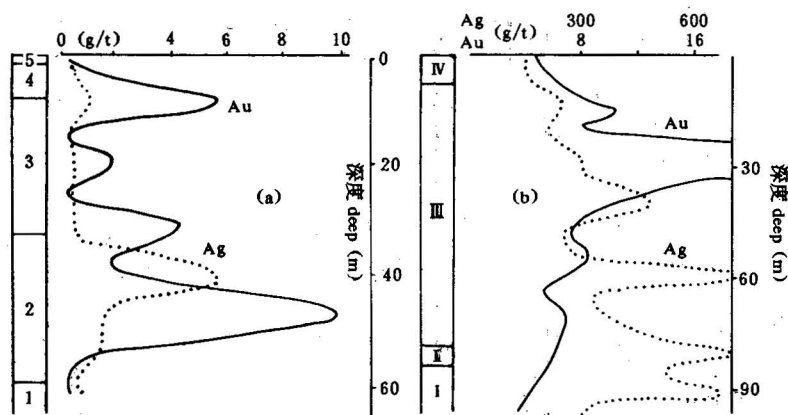


图 2 不同气候区金属硫化物矿床氧化带金、银分布规律对比

(据王恩德, 1991)

Fig. 2 Comparison of Au and Ag distributions in the oxidation zone of metallic sulphide ore deposit in different climatic areas

(By Wang Ende, 1991)

a 干旱气候区赛乌素金矿床; b 潮湿气候区铁帽型金矿床

1. 原生矿石带; 2. 浅灰色花岗岩风化亚带; 3. 黄褐色花岗岩风化带; 4. 高价铁质亚带; 5. 碳酸盐亚带;

I. 原生矿石带; II. 次生硫化物亚带; III. 金、银富集亚带; IV. 完全氧化带

a Sain Us gold deposit in the arid climatic areas; b gossan gold deposit in moist climatic areas

1. Primarg ore zone; 2. light gray weathering granite subzone; 3. yellow-brown weathering granite subzone;

4. ferric subzone; 5. carbonate subzone; I. primary ore zone; II. secondary sulphide subzone;

III. gold and silver enrichment subzone; IV. perfectly oxidized subzone

“上金下银”的规律^①(图 2 b)形成鲜明对比。以上规律得到了笔者最近在我国西北广大干旱气候区中 10 个典型金属硫化物矿床氧化带实地工作的进一步验证^[5]。

4 氧化带中金次生富集机制的研究

4.1 金、银的“双峰”富集与太阳泵效应

该矿区年蒸发量是年降水量的 11.4 倍, 反映出太阳泵(sun pumping) 的强大作用力。地质学领域首先引入太阳泵或蒸发泵(eoporative pumping) 机制的是“萨布哈(Sabkha)”成盐说^[6]; 无论早期或现代分布于世界各地、各种类型的萨布哈, 其共同特点都是矿质的沉淀界面位于水面以上; 主要成因是依赖于太阳能高蒸发作用产生的一种垂直水动力梯度使水向上迁移。年蒸发量与年降水量比值越高, 太阳泵作用力越强; 在干旱气候区太阳泵作用对矿床氧化带中成矿及伴生元素的空间分布具有重要意义; 但对太阳泵作用深度目前尚无人作过具体研究。从定性成因机制方面看, 这是一种由太阳泵造成使水向上运移的力与地球重力场造成使水向下运移的力之间的力学平衡问题。本文从这一机理出发以示意图(图 3)来表示太阳泵作用。在干旱

① 王恩德. 金的表生成矿地球化学. 博士论文. 东北工学院, 1991.

气候区,如出现一次降水,在地质剖面上将会出现如下两种情况:

(1)降水量较大,部分水可渗透过B线以下(当然与地质体的可渗透性有关);(2)降水量较小,水保持在B线之上。

情况(1)中B线以下的水将受控于地球重力场向下运移;情况(2)及情况(1)中B线以上的水在降水之后都将受控于太阳泵的蒸发力向上运移。图3中B线反映了太阳泵与地球重力场作用力偶为零的大概位置,是太阳泵作用的有效深度。

结合该矿氧化剖面考虑,大气降水与氧化矿体之间将发生着无机、有机和微生物的各种地球化学反应,并形成低(常)温含矿流体。这些流体在氧化带中受太阳泵与地球重力场的控制必将出现向上与向下两个方向的流动,并受不同物理化学环境控制出现次生富集。因此,可以认为太阳泵是干旱气候区矿床氧化带中金、银等元素出现双峰富集的主要成因机制。

4.2 金下部富集峰与pH的关系

该矿床氧化带中金、银与pH的关系见图4^①;从图4中可见,在氧化带下部pH值最低部位对应出现了金的下部富集峰;从硫化物矿床氧化带形成的地球化学模式^[7]看,该部位被活化金的迁移形式主要是以硫为主的各种配位体而形成的络合物,如 $\text{Au}(\text{HS})_2$, $\text{Au}(\text{HS})_2^-$, $\text{Au}(\text{HS})_2\cdots$ 等形式。这些金的络合物的溶解度在中性时最高,酸性时最低(Seward, 1984)^[8](图5)。基于前人实验结果及对该矿氧化剖面的分析,认为已活化的金与硫的各种配位体形成的络合物在随溶液向下渗透过程中,随pH下降,必将导致含金流体中金溶解度迅速降低和在氧化带下部pH最低部位出现一个明显的金的次生富集峰,这种规律已得到笔者进一步的证实^[5]。可以认为,在接近该类矿床氧化带下部,硫化物的氧化正在进行,介质pH值最低的空间是金次生富集最有利的空间之一。pH值的降低是赛乌素金矿床氧化带中金下部富集的主要成因机制之一。

4.3 金上部富集峰与粘土矿物的关系

金属硫化物矿床氧化带中粘土矿物发育较普遍,但其数量不多且较分散;该矿氧化带正是如此。粘土矿物主要发育在表生带岩(矿)石的裂隙中;多数被 Fe_2O_3 染成褐红色,主要以很细的粉尘形式存在。经对氧化带系统样品中粘土矿物的提取、提纯及鉴定工作^②,确认该矿氧化带中存在三种主要粘土矿物,即:无序高岭石(Kd, disordered kaolinite)、Na-Ca 蒙脱石(Mo, Na-Ca Mont-

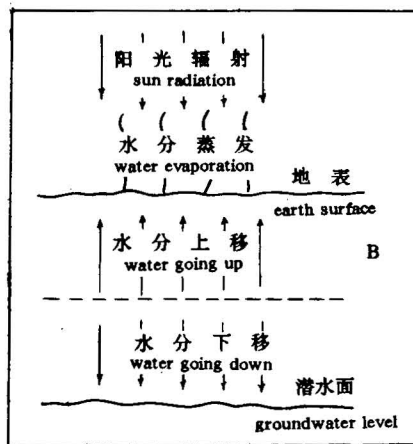


图3 太阳泵作用机制示意图
Fig. 3 Diagram showing mechanism of sun pumping effect

① 金、银含量由冶金工业部保定地球物理勘察院用化学方法测定;pH是笔者采用原岩(矿)样的饱和悬浮液,用25型酸度计测定;其方法为在室温(20℃)下,将4g200目原矿样溶于20mL(pH=6.8)的蒸馏水中,浸泡5min后测定。

② 对提取、提纯后的粘土混合样品在中国科学院地质研究所分别进行了X光衍射、差热分析、红外光谱鉴定及扫描电镜的观察与照像。

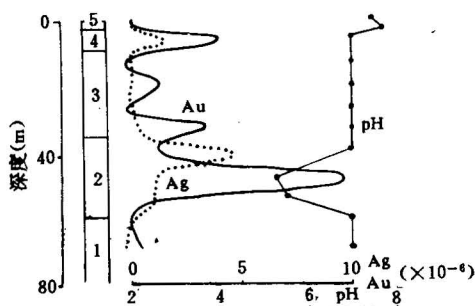


图4 赛乌素金矿氧化带金、银分布与pH的关系
Fig. 4 The relationship between the Au and Ag distributions and the pH in the oxidation zone of the Sain Us gold deposit

1. 原生矿石带; 2. 浅色花岗岩风化亚带; 3. 黄褐色花岗岩风化亚带; 4. 高价铁质亚带; 5. 碳酸盐亚带
1. Primary ore zone; 2. light gray weathering granite subzone; 3. yellow-brown weathering granite subzone; 4. ferric subzone; 5. carbonate subzone

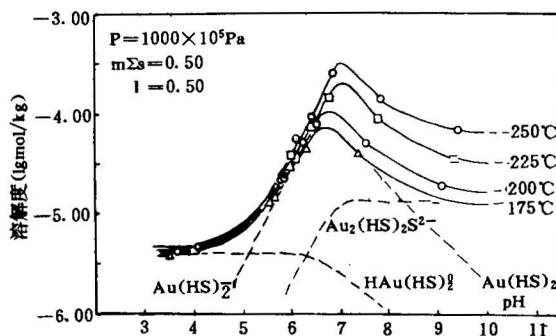


图5 硫化物溶液中金的溶解度和主要存在形式与pH的关系

Fig. 5 The relationship between pH and the solubility and main mode of occurrence
mΣS 还原硫总量(H_2S+HS^-); I 离子强度
mΣS The sum of reduced sulphur (H_2S+HS^-);
I ion intensity

mori-llonite)和伊利石 $2M_1$ (I $2M_1$, Illite $2M_1$)。

对每个混合粘土样品及其中不同粘土相对含量和对应金、银含量组成的矩阵进行了因子分析,共得到四个主因子;可清楚地解译出各因子的地质地球化学意义:

- F_1 代表金、银的分布;
- F_2 代表 I $2M_1$ 分布;
- F_3 代表 Kd 的分布;
- F_4 代表 Mo 的分布。

在 F_2 及代表粘土主体含量的 F_3 构成的二维因子空间^[9]中,将各样品对应投点得图6。从图6中得知:含金高的样品趋向 F_2 正值空间分布,显示出伊利石 $2M_1$ 与含金量的正相关性;多数样品趋向 F_3 正值空间分布,反映出粘土总体含量与金、银含量的正相关性内涵,说明粘土矿物总体对金、银具吸附的意义。

为寻求在氧化带不同部位粘土矿物与金、银的关系,将每个样品中 F_1 与 F_2 的斜交因子得分按各样品在氧化剖面实际位置投点得图7。从图7中可得知: F_1 与 F_2 波动趋势基本相同而显示出金、银与伊利石 $2M_1$ 之间总体正相关性; F_1 与 F_2 在距地表 16m 以上空间波动幅度十分接近反映出伊利石 $2M_1$ 对金、银次生富集具有重要的地球化学成因意义。

总体看,粘土矿物与金、银次生富集之间的关系在该矿氧化带中主要表现为粘土矿物的主体含量(以无序高岭石为主要代表)对金、银次生富集具有普遍吸附意义,其中伊利石 $2M_1$ 对金、银次生富集的上部峰具有更显著的成因意义;具体反映在该矿氧化带 16m 深之内的空间范围。

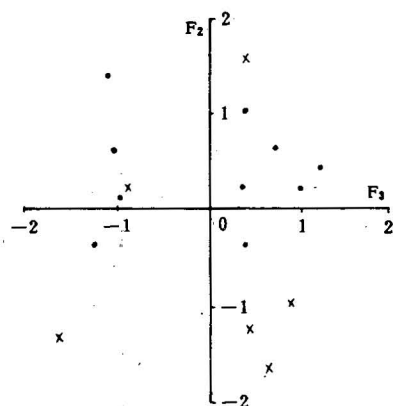


图6 含金粘土样品二维因子平面投影图

Fig. 6 Projection diagram of the auriferous clay samples on the two dimensional factor plane

F_2 伊利石 $2M_1$; F_3 无序高岭石; • 样品含金量 $> 100 \times 10^{-9}$; × 样品含金量 $< 100 \times 10^{-9}$
 F_2 Illite $2M_1$; F_3 disordered kaolinite;
 sample gold content $> 100 \times 10^{-9}$; × sample gold content $< 100 \times 10^{-9}$

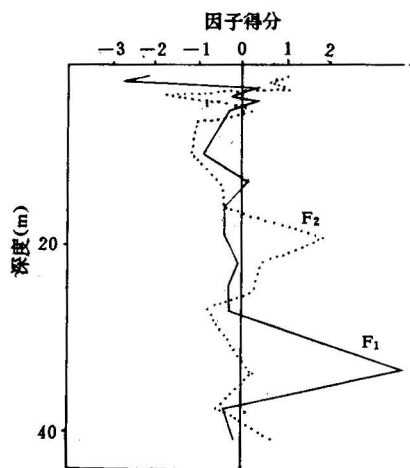


图7 赛乌素金矿氧化剖面二斜交因子得分投影图

Fig. 7 The projection of two inclined cross factor date on the oxidation profile of the Sain Us gold deposit

F_1 金-银; F_2 伊利石 $2M_1$
 F_1 Au-Ag; F_2 Illite $2M_1$

5 结论

该矿床氧化带在近1万年来的冰后期时间内,一直受控于干旱气候;矿床氧化带地质特征及其中金、银空间分布规律可作为干旱气候条件下同类矿床中的典型代表。该矿氧化带中金、银具有双峰富集规律,其成因主要来自太阳泵的蒸发力与地球重力场的引力对剖面中含矿流体的争夺所致;金、银基本在同一深度富集,金的下部富集峰主要受控于pH值降低的环境;金、银的上部富集峰主要与粘土含量增多对其吸附有关,特别是伊利石 $2M_1$ 与金、银上部次生富集具成因关系;有关伊利石 $2M_1$ 与金、银次生富集的内在地球化学成因机制有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 马民涛,关广岳.不同气候区金属矿床氧化带地质特征及金次生规律对比研究.第五届全国矿床会议论文集,北京:地质出版社,1993.187-189页.
- 2 中国科学院中国自然地理编辑委员会.中国自然地理(古地理)上册.北京:科学出版社,1984.9-13页.
- 3 张家诚,林之光.中国气候.上海:上海科学技术出版社,1985.467-526页.
- 4 王富葆.一万年来青藏高原气候变化及其发展的初步研究.第四纪冰川与第四纪地质论文集(二).北京:地质出版社,1985.153-161页.
- 5 马民涛.中国西北干旱气候区亲铜元素矿床表生地球化学.长春:吉林大学出版社,1995.
- 6 郑明华.现代成矿学导论.重庆:重庆大学出版社,1988.221-225页.

- 7 马民涛,关广岳. 金属矿床氧化带中铁矿物的演化及其与金次生富集的关系: 辽宁地质, 1993, (1): 45—50.
8 刘英俊,马东升. 金的地球化学. 北京: 科学出版社, 1991. 130—148 页.
9 余金生,李裕伟. 地质因子分析. 北京: 地质出版社, 1985. 147—194 页.

SUPERGENE GEOCHEMISTRY OF GOLD AND OXIFATION ZONE OF THE SAIN US GOLD DEPOSIT OF THE INNER MONGOLIA ARID CLIMATIC REGION

Ma Mintao

(*Department of Geology, Shenyang Gold College, Shenyang, Liaoning*)

and Guan Guangyue

(*Northeastern University Shenyang, Liaoning*)

Abstract

The Sain Us gold deposit is a typical auriferous sulfide quartz vein deposit in the arid grass-land climatic zone of Inner Mongolia. The oxidation zone has been controlled by the arid climate since the beginning of Holocene. Gold supergene evolution is characterized by enlargement of gold grains, complication of the gold form, raising of the gold grade and increase of the gold fineness; besides it also shows that gold and silver have two enrichment peaks at the same depth, which is in sharp contrast to the unimodal enrichment of gold and silver and the regularity of occurrence of gold above and silver below in moist climate areas. Sun pumping is the main cause for the bi-modal enrichment of gold and silver. The lower enrichment peak gold is related with the low-pH environment. Illite 2 M₁ is one of the main causes for the upper enrichment peak of gold and silver.

Key words: arid climate, gold deposit oxidation zone, gold supergene enrichment, paleo-climate, sun pumping

作 者 简 介

马民涛, 1955 年 9 月生。1982 年 1 月毕业于长春地质学院地球化学找矿专业。此后至 1990 年初任教于沈阳黄金学院地质系; 1993 年 12 月在东北大学获工学博士学位。现在长春地质学院博士后流动站工作; 副教授, 多年来一直从事金矿地质地球化学研究, 自 1990 年以来主要从事亲铜矿床氧化带的地质地球化学研究。通讯处: 长春市西民主大街 6 号地质宫长春地质学院地球化学系, 邮政编码: 130026。